

名古屋港の貧酸素水塊に関する現地調査

杉山陽一*・依田 眞**・原田一利***

1. はじめに

名古屋港は奥行き 10 km 強の南北に細長い地形を持ち、南側の港口には高潮防波堤が設置されている閉鎖性の強い水域である。この港の奥部（北側）に位置する約 2 km 四方の海域は内港地区と呼ばれ、都市域からのアクセスが良く親水公園などが立地している。当地区には中部電力（株）の新名古屋火力発電所も立地しており、最大で $38 \text{ m}^3/\text{s}$ の取放水を行っていることから、比較的大きな人工流動が存在することも特徴である。また、内港地区には、水辺環境に対する名古屋市民の高い関心が向けられる堀川が流入し、その河道の大半が感潮区間である堀川の水質に対しても、大きな影響を及ぼしている。しかし、水質は決して良い状態ではなく、公共水域調査によれば夏季の底層貧酸素状態は 20 数年で顕著な改善は見られていない。本研究では、この水域の水質改善を目指す足がかりとして、既存のデータからではよく分からない水質の実態、特に底層の貧酸素水に着目して現地観測を実施したので、その結果について報告する。

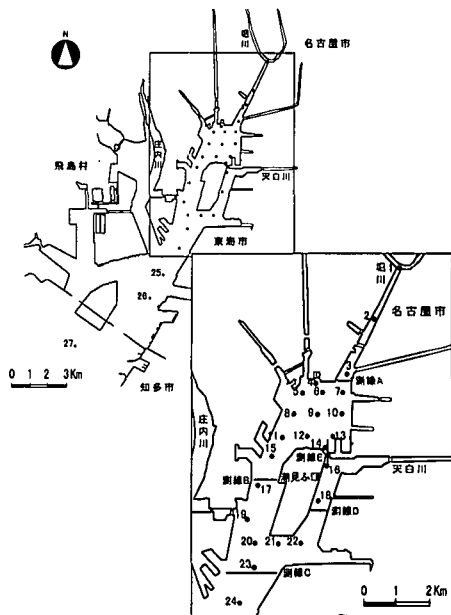
2. 観測の概要

図一に調査対象海域の地形と測点および測線を示す。今回特に着目したのは内港地区と呼ばれる水域である。この水域は名古屋港の最奥部に位置するうえに、南側にある潮見埠頭により海水の出入りする水路が狭められており、地形的な閉鎖性が特に強い。潮見埠頭は島になった埋め立て地であり、内港地区の海水の出入りは、この埠頭の西側にある幅 700 m 強の水路と、東側にある幅 100 m の細い水路に依っている。内港地区には堀川をはじめとしていくつかの河川が流入しているが、いずれも流量は小さく、すべて合わせても数 m^3/s 程度である。海底地形は航路部分が掘り下げられているが、平均的にはおよそ 10 m 程度になっている。

観測は水質と流況の調査を実施した。水質調査は 2000 年 8 月 4 日～10 月 6 日の間に 1 週間間隔で 10 回実施し

た。測点は図一に示すとおり、内港地区を中心に堀川を含む名古屋港内に 27 点設けた。各測点では多項目水質計（アレック電子社製 クロロテック）を使い、溶存酸素、クロロフィル蛍光、水温、塩分、濁度の鉛直分布を測定した。溶存酸素の測定水深は海面下 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 8, 10, 底上 1 m とし、その他については海面下 0.1 m から 0.1 m 間隔で海底まで測定した。2 回目（8/18）と 8 回目（9/22）の観測では、海表面、海面下 5 m、底上 1 m の 3 層で採水し、 COD_{Mn} と窒素およびリンの分析を行った。

流況調査は、港内への水の流入状態の把握するために実施した。観測日は比較の日潮不等の小さい 2000 年 8 月 21 日を選定した。図一に示すように、港内の 5 か所に航路を横切る測線を設け、各測線で超音波流速分布計（RD Instruments 製 BBADCP-DR1200）を曳航引きする横断観測を実施した。測線 A は堀川と内港地区の境界、測線 B は内港地区の南部境界、測線 C は名古屋港を南北に分ける境界、測線 D は潮見埠頭東側水路の代表として



図一 調査対象海域の地形と測点・測線

* 正会員 博(工) 中部電力株式会社 電力技術研究所 研究員

** 正会員 工 修 中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査

*** 正会員 生 修 株式会社テクノ中部 環境部

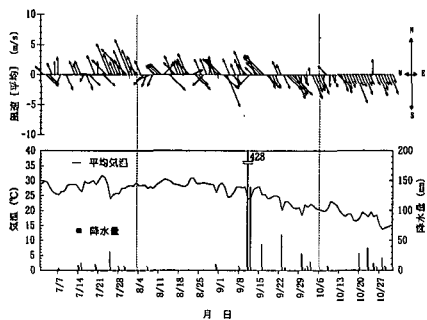


図-2 観測期間中の気象

設定した。測線 E は内港地区と潮見埠頭東側水路を結ぶ、幅 100 m、深さ 5 m 弱の小水路を南北に縦断するように設定した。測定水深は海面下 1.5 m を第 1 層とし、以下 0.5 m 間隔とした。横断観測は 1 測線あたり 8 回/12 時間実施し、1 潮汐間の流況の変化を捉えとともに、潮汐振動成分を差し引いて残差流を算出した。ADCP の曳航観測により取得した原データは、測定回毎に地点数や測定位置が微妙に異なっているため、時系列的な解析に供する際、原データに対し空間平均処理を施し、各測線毎に地点数とその位置を統一した。空間平均の水平距離は、平均後の各測線の地点数を考慮し、100~140 m 程度とした。残差流の算出は、杉山ら (1995) の方法と同様に名古屋港の予報潮位を参照して算出した。

図-2 に観測期間前後の気温、風、降水の変化を示す。8 月の平均気温は平年に比べ $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 高かった。降水は 9 月 11~12 日に記録的な東海豪雨 (566 mm: 名古屋気象台) を経験した。

3. 水質観測結果

(1) 代表測点における水質の経時変化

図-3 に内港地区の中心の測点 9 における水温・塩分の鉛直分布を観測回数分重ね合わせた図を示す。変動はあるものの、観測期間中を通じて密度躍層は両測点ともに、およそ海面下 3~4 m に存在したことがわかる。以下では躍層より浅い層を上層とし、深い層を下層とする。

点 9 と名古屋港の中心の測点 24 を代表測点として、水質の経時変化について述べる。上層の代表として海面下 1 m を、躍層以深の下層の代表として底上 1 m (測点 9 で海面下約 9 m、測点 24 で海面下約 14 m) を、中間層として躍層直下の海面下 5 m を選び、水温、塩分、クロロフィル蛍光、溶存酸素の経日変化を図-4 に示す。

水温は、時間とともに上層では下降、下層では上昇し、上下の水温差が小さくなるように変化した。塩分は、上層では東海豪雨直後の 9/14 日に急激に低くなり、この影響が豪雨の 10 日後の 9/22 日にも残っていた。しかし、その期間を除くと徐々に高塩分化しており、下層の塩分が

終始 32 (psu) 前後で安定していたため、密度成層は弱まるように変化した。

クロロフィル蛍光は、上層だけが激しく増減を繰り返したが、東海豪雨直後の 9/14 には一旦下層と同等まで低下し、その 1 週間後に急激に濃度の上昇した。この濃度上昇は中間層 5 m まで影響したが、さらに 1 週間経過すると再度下層と同等まで低下した。

溶存酸素は、上層ではクロロフィル蛍光とほぼ同じように変動していた。測点 9 の下層では、観測期間を通じてほぼ 0 mg/L と無酸素状態であり、中間層でも東海豪雨の前後を省き 2 mg/L 以下と貧酸素状態になっていた。一方、測点 24 の下層ではやや貧酸素傾向であるものの、測点 9 のように継続して無酸素状態になることはなかった。

名古屋港では、上層は光合成活動が活発で豊かな酸素状態であり、下層であっても港中央付近では貧酸素はそれほど深刻ではない。しかし、奥部になると躍層下の厚い下層全体が貧酸素化しており、これは東海豪雨などの希有な気象擾乱を受けてもあまり変動することがなく、

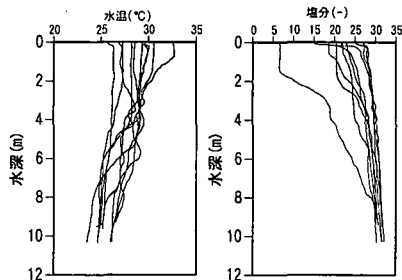


図-3 観測期間中の水温・塩分の鉛直分布

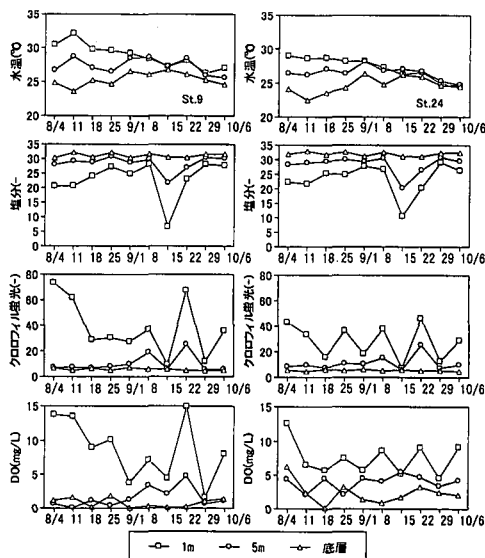


図-4 代表測点における水質の経時変化

強固で深刻な状態になっていることが分かる。

(2) 溶存酸素の縦断面分布

次に、港の縦断面における溶存酸素の分布を図-5に示す。断面は堀川から高潮防波堤外まで、測点1, 2, 3, 7, 9, 11, 15, 17, 20, 23, 24, 25, 26, 27を結んだものである。測点1から3までが堀川、測点3から15までが内港地区、測点15から20までが潮見埠頭東側、測点20から26までが港南部、測点27が高潮防波堤外にあたる。なお、観測は1週間間隔で午前9~14時に実施しているため、観測時の潮時は、1回おきによく似た潮時になる。図-5の左側半分(8/4, 18, 9/1, 14, 29)は、比較的潮位差の大きい中潮から大潮にかけての下げ潮時に観測されている。一方、図-5の右側半分(8/11, 25, 9/8, 22, 10/6)は比較的潮位差の小さい中潮から小潮にかけての上げ潮時に観測されたものである。

以下では、溶存酸素が1 mg/L以下を無酸素水、3 mg/Lを貧酸素水と定義して記述する。まず、観測期間を通して、堀川では海面下3 m以下、また内港地区では海面下6 m以下と、常に無酸素水が存在していた。極端な場合には、堀川では水面まで無酸素水で占められ、内港地区では海面下3 m以下がすべて無酸素水で占められることがあった。潮見埠頭東側では、8月から9月前半までみられた無酸素水が、9/22以降観測されなくなり、徐々に酸素状態が回復していたと思われる。一方、港南部では無酸素水はみられず、貧酸素水でもあまり観測されることはなかったことから、港の南半分以南では酸素状態は良好に維持されていたと判断できる。

図-5をみると、8/11や8/25あるいは10/6などでは、

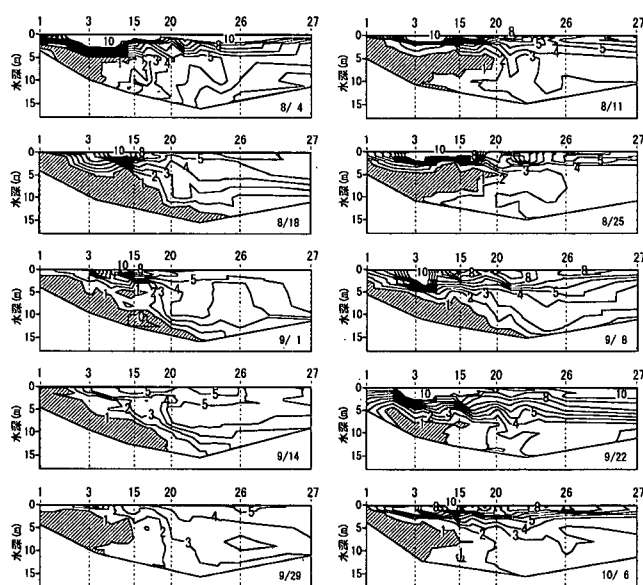


図-5 溶存酸素の縦断面分布

内港地区や潮見埠頭東側において、無酸素水が中間層に浮上することがあった。このような分布が見られる時は、約33 psuの高塩分水が底層に進入しており、それより1 psu程度塩分の低い無酸素水が持ち上げられた形になっていた。また、このような分布は図-5の左側に多く、上げ潮時に調査されたものであることから、潮時が影響した可能性がある。

なお、海表面近くでは概ね酸素状態は良好であるが、特に堀川河口の測点3付近で顕著な増加が見られている。この付近はクロロフィル蛍光の増大も確認できるため、光合成の影響と考えられる。堀川河口はリン濃度が高く、プランクトンの増殖には適した場所であると思われる。

4. 流況観測結果

(1) 流況の経時変化

図-6に各測線の中央で計測した北向き流速成分(北向きが正)の鉛直分布の経時変化を示す。測線Aでは、流速値は他の測線と較べて小さいが、上げ潮時には北向きに流れ、下げ潮時には南向きに流れており、全層で潮位に素直従う流れになっていた。測線Bも潮位に対して素直に反応していたが、上げ潮時には海面下3 m以深で北向きに強く流れ、下げ潮時には海面下5 m以浅で強く南向きに流れており、流向が上下で異なる特徴があった。測線Cも潮位に対し測線Bと同じような傾向があったが、7, 8回目の表層は、潮時に関係なく北向き流れとなっており、観測終盤で強くなってきた南風の影響がみられる。測線Dでは、海面に近いほど流速は早いが流向については上下の差は明瞭でなかった。測線Eの水深は5 m弱と上層厚に近く、流向に上下の差はなかったが、潮位の位相からは著しくずれており、満潮に近づくにつれ、内港地区の海水を排出するように南向きに流れ、干潮に近づくにつれ、内港地区に海水を供給するように北向きに流れた。

内港地区への海水の流出入状況を把握するため、各測線の断面通過流量を算出したものを図-7に示す。ただし、測線Eについては、細くなった水路付近で計測した5つのデータを平均して水路断面積をかけて断面通過流量とした。この図から、測線Aにおける断面通過流量は測線Eよりも1オーダー大きいことがわかる。地形をみても明らかなように、潮見埠頭の西側は狭いところでも約700 mの幅の水路なのに対し、東側は水深の浅い約100 m幅の水路がボトルネックになっており、内港地区への海水の出入りは、主に西側

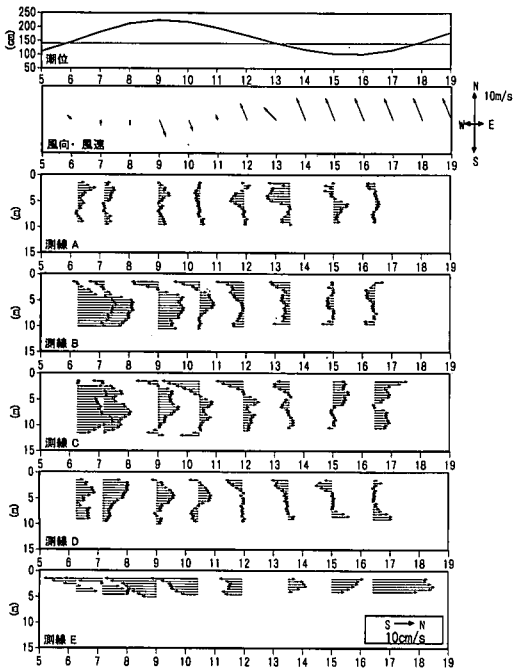


図-6 各測線の北向き流速の経時変化

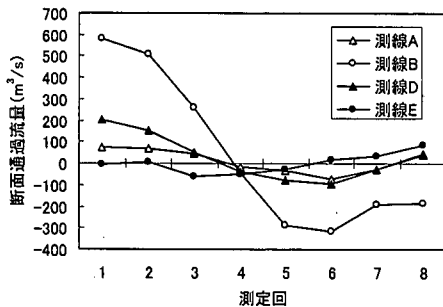


図-7 各測線の断面通過流量(測線Cを除く)

の水路でおこなわれていることがわかる。また、内港地区では、潮見埠頭西側水路から効率良く海水が供給されるため、幅が狭く鉤状に曲がった潮見埠頭東側の水路よりも水位の変動が大きく、測線Eの南北で水位差が生じやすいと思われる。今回の観測で測線Eの潮流変動が他と著しく位相がずれていたのは、この水位差が原因であると考えられる。

(2) 残差流の断面分布

観測された流況データから2章に示した方法で残差流を算出した。ただし、測線Eは潮位変動から位相のずれが著しく、この方法は適用できなかったため、測定回分の単純平均を参考値として示すことにした。また、求めた残差流は各測線の両端でほぼ同じ傾向を示したため、測線の横断方向に平均処理した残差流の鉛直分布を図-8に示す。図は南北成分のみを示しているが、東西方向の

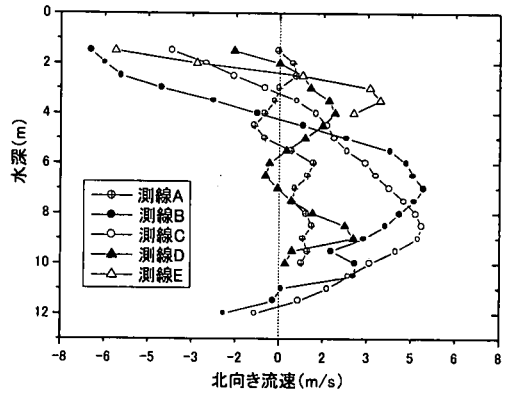


図-8 各測線の残差流の鉛直分布

表-1 各測線の全層流量と下層流量

項目	断面A	断面B	断面C	断面D	断面E
全層平均流速 (cm/s)	0.42	0.77	1.88	0.75	0.24
全層流量 (m³/s)	19	69	350	35	1
下層平均流速 (cm/s)	0.60	2.73	3.02	0.78	
下層流量 (m³/s)	16	164	374	22	

流れについては、測線Cの下層で潮見埠頭東側水路に向かう流れが見られた以外は極めて微弱であった。図-8をみると、測線B、Cでは下層流入(北上流)、上層流出(南下流)の流況は明瞭であり、エスチュアリー循環が成立していることがわかる。測線Cの上層に見られる南下流は測線Bと較べるとやや小さいが、前節でも指摘したように、測点Cでは観測日の後半に強くなってきた南風が表層に影響しており、この影響が残差流にも反映されたものと思われる。測線Aは、最奥部にあたるため流速値が小さく、ばらつきもあるが、基本的には下層流入、上層流出の流況になっていると判断できる。しかし、測点Dは流れの傾向をつかむことはできなかった。測点Eでは下層流入、上層流出になっていたが、水深が浅く全層が上層に含まれるため、エスチュアリー循環に相当する流れでは無いと思われる。

残差流から各測線における断面通過流量(北向きを正)を求めたものを表-1に示す。表には、計測層すべての総和である全層流量と、海面下4m以下の残差流から算出した下層流量を示している。ここで求めた全層流量はかなり大きな値を持つが、その多くはADCPの機能的な制限に起因した誤差であると考えられる。用いたADCPでは、海面および海底近傍1m程度の流速を計ることができず、特に流速が大きい海面近傍流速の欠測が誤差として影響しやすい。求めた流量がすべて正の値になっているのは海面付近の南向きの残差流が欠測になった影響の

現れである。全層流量で重要なのは、測線 E の値が $1 \text{ m}^3/\text{s}$ と極めて小さいということであり、平均的な海水の出入りを考える場合に限り、ここに位置する小水路は無視することが可能であると判断できる。

エスチュアリー循環が成立している海域において、平均的な海水の出入りを考える場合には、全層流量よりも下層流量の方が重要になる。欠測の影響が大きい上層流量よりも、下層流量の方が信頼性も高い。測線 E での下層流量は無いため、内港地区への海水の流入は測線 B 下層の $164 \text{ m}^3/\text{s}$ のみと考えると良い。そのうち $16 \text{ m}^3/\text{s}$ が測線 A から堀川に流出するので、残りの $148 \text{ m}^3/\text{s}$ は内港地区の上層に流れる。この時の湧昇速度はおよそ $3 \text{ m}/\text{day}$ である。上層に入った海水は淡水と混合しながら、測線 B の上層から内港地区の外に流出する。このエスチュアリー循環は、内港地区の海水の全量を約 3 日で交換するほどの大きさである。

5. 考 察

流動観測から、名古屋港ではエスチュアリー循環が発達しており、海水交換の速度がかなり早いことがわかった。しかし、無・貧酸素水塊は内港地区を中心に、観測期間を通して頑固に存在した。このことから、内港地区に無・貧酸素水塊が存在する理由は、海水交換が悪く海水がそこで滞留するため、と言うのではなく、内港地区での酸素消費もさることながら、強いエスチュアリー循環に乗って港外水が内港地区へたどり着く過程において酸素が消費され、常に無・貧酸素水が下層から供給されている効果が大きいのではないかと考えられる。図-5 をみると測点 26 では海底近くでも溶存酸素は $3 \text{ mg}/\text{L}$ 以上あることが多かった。この下層水がエスチュアリー循環に乗って内港地区の中心である測点 9 に到着した時には $0 \text{ mg}/\text{L}$ になっている。表-1 から、下層の残差流速は約 $3 \text{ cm}/\text{s}$ であり、測点 9 と測点 26 の距離は約 9 km であるので、この間の移動に必要な時間は 3.5 日である。このことから酸素消費速度は $0.86 \text{ mg}/\text{L} \cdot \text{day}$ と概算することができる。この値は下層水中と海底面における酸素消費速度の合算値と考えると良い。下層水中の酸素消費速度については、例えば西條 (1984) が三河湾での既往研究成果をレビューする中で、BOD ビンを使った現場試験の結果から $0.72 \sim 1.2 \text{ mg}/\text{L} \cdot \text{day}$ であったとしている。また、長尾ら (2000) は広島湾において海底面の酸素消費量を現場で連続測定し、 $0.21 \sim 5.43 \text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$ であったことを報告している。これを 6 m 厚の下層に含まれる酸素が海底のみで消費されると仮定して、体積あたりに換算すると $0.04 \sim 0.91 \text{ mg}/\text{L} \cdot \text{day}$ となる。これらの値との比較から、今回の概算値と妥当な値であることが判断できるため、流入過程における酸素消費が内港地区

の無・貧酸素水塊の形成に大きく寄与していると考えよう。

次に、鉛直方向の溶存酸素の移動について考える。内港地区を例にとると、下層の無酸素状態をよそに、表層部では植物プランクトンが盛んに光合成活動をしており、溶存酸素は過飽和の状態にあり、東海豪雨のような大きな気象攪乱を受けても溶存酸素の上下層の関係が変わることはなかった。濃度の鉛直方向の移動は移流と拡散のいずれかによるため、両者を比較するため、次のような時間スケールを考える。

$$T_a = L/V \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T_d = L^2/K \quad \dots\dots\dots (2)$$

T_a は鉛直移流の時間スケール、 T_d は鉛直拡散の時間スケールである。 L は代表長さでここでは水深をとり 10 m とする。 V は鉛直流速であり、前章で示したとおり $3 \text{ m}/\text{day}$ であるから T_a は約 3 日となる。 K は鉛直渦動拡散係数であり、河島ら (1991) が同じような水深をもつ伊勢湾内の火力発電所取水口前面海域で現地観測した鉛直渦動粘性係数を参照して $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ とすると、 T_d は $1 \sim 100$ 日となる。実際には渦動拡散係数は渦動粘性係数より小さくなるため、 T_d はもう少し長くなる。2 つの時間スケールを較べると、鉛直乱れがよほど大きくなっても移流と拡散の効果は同等程度であり、通常は圧倒的に移流の効果が大きいことが分かる。移流の効果は常に下から上へと働くため、せっかく表層にたっぷり存在する酸素も、下層にはほとんど影響することがない。東海豪雨のように大量の降雨が特徴で風はそれほどでもない気象攪乱は、もっぱらエスチュアリー循環を強めるように働き、内港地区では鉛直上向き流速が強められるため、底層の貧酸素を改善する効果は現れにくいと考えられる。

6. おわりに

本研究により、名古屋港奥部の強固な無・貧酸素水塊の成立には、エスチュアリー循環が大きな役割を果たしていることが指摘できた。この海域の水質浄化を考える場合、ここで示した海域独自の流動特性を考慮することは、極めて重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995): ADCP による伊勢湾の流動調査, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1101-1105.
- 西條八束編 (1984): 内湾の環境科学上巻, 培風館, 167 p.
- 長尾正之・橋本英資・朱 小華・吉田みゆき・高杉由夫 (2000): 広島湾における海底酸素消費量の連続測定, 土木学会論文集, No. 663, pp. 109-117.
- 河島宏治・浦上博行・池田和彦 (1991): カーテンウォールの深層取水特性に関する現地調査, 土木学会第 46 回年次学術講演会論文集, pp. 682-689.